International Science Journal of Engineering & Agriculture
2024; 3(1): 61-74
https://isg-journal.com/isjea
doi: 10.46299/j.isjea.20240301.07
ISSN: 2720-6319

Диференціація профільного розподілу CO_2 ґрунтового повітря та оцінка стійкості системи «ґрунт – атмосфера» до абіотичних впливів

Петро Трофименко
ННІ «Інститут геології», кафедра геоінформатики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
ORCID 0000-0002-7692-5785

Для цитування цієї статті:
Трофименко Петро. Диференціація профільного розподілу CO_2 ґрунтового повітря та оцінка стійкості системи «ґрунт – атмосфера» до абіотичних впливів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No. 1, 2024, pp. 61-74. doi: 10.46299/j.isjea.20240301.07
Надійшла до редакції: 17 грудня 2023 р.; **Схвалено:** 20 січня 2024 р.;
Опубліковано: 01 лютого 2024 р.

Анотація: В статті представлено результати досліджень диференціації профільного розподілу двоокису вуглецю ґрунтового повітря та проведено оцінку стійкості системи «ґрунт – атмосфера» до абіотичних впливів. Показано, що емісійно-асиміляційну активність ґрунту необхідно розглядати у якості єдиної та взаємно обумовлюючої системи біологічного обігу органічного вуглецю у двох протилежних напрямках «ґрунт ↔ атмосфера» та атмосфера ↔ ґрунт», як важливої ланки загального колообігу цього елементу під час виробництва рослинницької продукції. У якості критеріїв оцінки стану системи «ґрунт ↔ атмосфера» до абіотичних впливів запропоновано використовувати, коефіцієнт $Kref$ (оновлення запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі) та час оновлення запасів двоокису вуглецю ($tref$), які дозволяють оцінити інтенсивність повітряного обміну за профілем, залежно від глибини, ступеня зволоженості та значень маси CO_2. Важливим критерієм оцінки стійкості (динамічності) системи «ґрунт ↔ атмосфера» є коефіцієнт стійкості системи (чинник "Stability factor"), який розраховується на основі емпіричного рівняння і являє собою співвідношення між запасами CO_2 у надґрунтовому шарі повітря та у ґрунтовому повітрі (або на основі співвідношення значень величин відповідних концентрацій). Доведено залежність збільшення часу оновлення запасів з глибиною. Означена закономірність є загальною для усіх трьох періодів спостережень, незалежно від часу доби, рівня зволоження ґрунту, величин запасів CO_2 та значень наземної емісії. Порівняння значень часу оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря різних шарів вказує на ступінь мінливості їх маси на момент проведення досліджень, яка залежить від глибини, вологості та сумісному впливу комплексу чинників довкілля. Встановлено, що коефіцієнт стійкості перебігу емісії з ґрунтів CO_2 залежать від часу доби і коливаються в інтервалі від 0,60-1,33. При цьому стійкість ґрунтової ланки емісійної системи дерново-підзолистого глеюватого супіщаного ґрунту на водно-льодовикових відкладах практично в 6 разів перевищую стійкість наземної її частини. Тому оцінку емісійно-асиміляційної стійкості ґрунту до абіотичних впливів та розрахунку величини "Stability factor" пропонується проводити в межах системи «ґрунт ↔ атмосфера», що дозволить підвищити її об'єктивність.

Ключові слова: профільний розподіл, запаси CO_2, стійкість системи, статичний метод, емісія, асиміляція

1. Вступ

Чільне місце в частині оцінки потенціалу будь-якого ґрунту лежить його здатність до забезпечення повітряного режиму, визначення його параметрів у ґрунтовому профілі та особливостей трансформації під впливом зумовлюючих чинників. До останніх слід віднести зміну абіотичних факторів – вологості та температури ґрунту на його поверхні та за профілем, а також температури атмосферного повітря, швидкості переміщення повітряних мас та атмосферного тиску.

Вивчення особливостей та оцінка перебігу емісії двоокису вуглецю з поверхні ґрунту до атмосфери та спрямованість процесів утворення вуглекислоти у ґрунтовому профілю є важливою науковою проблемою. Врахування відмінностей абіотичних та біотичних впливів на стан повітряного обміну внаслідок осциляцій температури та вологості за профілем ґрунту, підвищує об'єктивність такої оцінки.

2. Мета досліджень

Виявлення закономірностей розподілу запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі, визначення критеріїв оцінки стійкості системи емісійно-асиміляційного потенціалу ґрунту на межі двох середовищ – атмосфери та земної поверхні шляхом застосування підходу синхронізації обох етапів (наземного та внутрішньоґрунтового).

3. Аналіз літератури

Загальновідомо, що вміст у ґрунті органічної речовини, яка лежить в основі родючості ґрунту відноситься та забезпечення його основних режимів функціонування [1, 17-23].

Дослідження біологічного колообігу органічного вуглецю на межі двох суміжних середовищ – ґрунту та атмосфери дозволяє краще зрозуміти процеси нагромадження та мінералізації органічної речовини, а також руху потоків CO_2 [5, 11, 8].

Деякі з дослідників, зокрема, Will Brinton (2015) за важливістю для виробництва продукції рослинництва на один щабель з запасом органічної речовини в ґрунті ставлять вміст CO_2 у ґрунтовому повітрі [16]. На його думку, сучасні агротехнології повинні максимально враховувати оптимальний рівень насиченості ґрунтового повітря діоксидом вуглецю.

При цьому слід зважати на це, що одним з раціональних напрямів використання ґрунтово-земельних ресурсів може бути біологізація землеробства та впровадження органічного й ґрунтозахисного його видів, які передбачають мінімізацію антропогенного впливу на ґрунт [4, 12]. З одного боку це дозволяє уповільнити процеси підвищення концентрації CO_2 в атмосфері та мінімізувати прояви глобального потепління, з іншого – закласти основи для уповільнення темпів зниження рівня родючості ґрунтів та загальної деградації.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом досліджень в статті є диференціація профільного розподілу CO_2 ґрунтового повітря та оцінка стійкості системи «ґрунт ↔ атмосфера» до абіотичних впливів.

5. Предмет дослідження

Обсяги наземної емісії CO_2 та профільна диференціація запасів діоксиду вуглецю в ґрунтовому повітрі, встановлення критеріїв та параметрів стійкості системи «ґрунт ↔ атмосфера», оцінка добового емісійного вуглецевого пулу на складові денної та нічної флуктуацій.

Зважаючи на вище зазначене, проведення досліджень наземної емісії, а особливо обґрунтування параметрів її екологічної оцінки для ґрунту, повинно здійснюватися у комплексі з оцінкою динаміки та профільного розподілу запасів органічного вуглецю, у першу чергу, у формі CO_2.

Разом з тим відомо, що величина концентрації CO_2 в ґрунтовому повітрі залежить від багатьох чинників: глибини за профілем ґрунту, пори року, щільності, вмісту органічної речовини, наявності у ґрунтовому середовищі вільного простору (пористості), рівня вологості, агробіологічних властивостей сільськогосподарських культур, інтенсивності обробітку та інших чинників.

Саме тому дослідження передбачали розв'язання наступних задач:

- дослідити обсяги запасів CO_2 за профілем ґрунту;
- інтенсивність оновлення запасів діоксиду вуглецю з глибиною;
- оцінити стійкість системи ґрунт ↔ атмосфера на прикладі дерново-підзолистого глеюватого супіщаного ґрунту на водно-льодовикових відкладах.

6. Методи досліджень

Для розрахунку маси вуглецю в ґрунтовому повітрі за профілем використано розроблений в результаті досліджень алгоритм [6, 13, 15], а також враховано величини загальної шпаруватості дерново-підзолистого ґрунту відповідно до результатів досліджень.

Ґрунтовий профіль дерново-підзолистого глеюватого супіщаного ґрунту на водно-льодовикових відкладах є типовим для перехідної зони Полісся України: Нп – 0–24 см, Н – 25–35 см, Е – 36–55 см, I (gl) – 56–90 см, P(gl) - 91-130 см (ДСТУ ISO 11259:2004. Спрощений опис ґрунту, 2006).

У відібраному з шару ґрунту 0-30 см ґрунтовому зразку визначали вуглець органічної речовини 0,78 %; гранулометричний склад за Качинським, фізична глина – 15,4 %; суму поглинених основ 2,2 ммоль/100 г ґрунту; нітратний та амонійний азот 3,57 та 14,04 мг/кг відповідно; рухомий фосфор і обмінний калій 133,4 та 201,8 мг/кг відповідно; гідролітичну кислотність 2,11 ммоль/100 г ґрунту; pH водний 5,5; pH сольовий 4,6.

Польовий етап передбачав застосування камерного статичного методу [3] з використанням ізолюючих камер та портативного газоаналізатора (рис. 1).

Застосування розробленого пристрою передбачає можливість визначати в ґрунтовому повітрі виділення широкого спектру біогенних газів, які характеризують особливості функціонування біоти та кореневих частин рослин на різній глибині ґрунту.

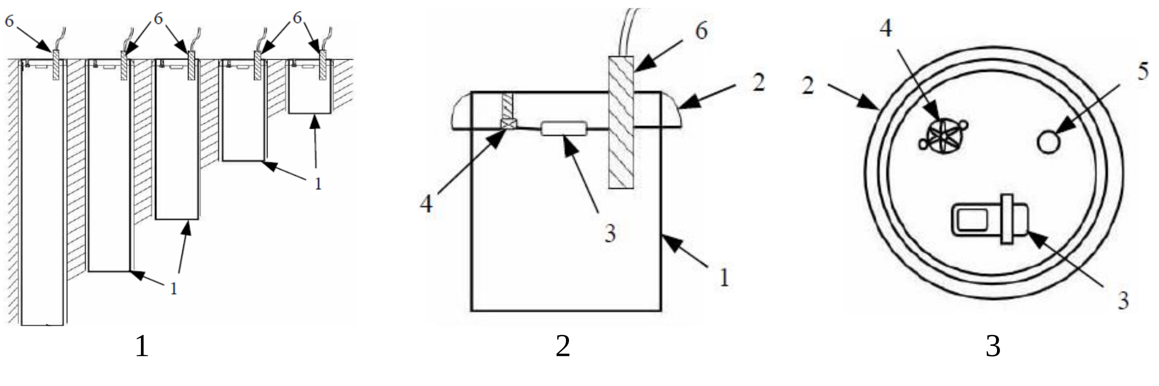


Рис. 1. Пристрій для визначення концентрації CO_2 та інших біогенних газів у ґрунтовому повітрі. На рисунку: «а» - комплект ізолюючих камер; «б» - збільшене зображення однієї із ізолюючих камер; «в» - вид зверху на знімну кришку. Пристрій містить: ізолюючу камеру - 1, знімну кришку із прозорого матеріалу - 2, портативну метеостанцію - 3, вентилятор з безколекторним електродвигуном - 4, отвір - 5, зонд газоаналізатора – 6 [2]

Розроблення вище представленого пристрою передбачало виконання польових досліджень, в ході яких проводилася почергова закладка шурфів діаметром 140 мм через кожні 10 см на необхідну глибину за профілем ґрунту.

Шурф у проміжку між камерою та стінкою шурфу додатково ізолювалася від доступу атмосферного повітря шляхом засипання вийнятим ґрунтом та легко ущільнювалася. Перед вимірюванням на кришку пристрою у вигляді щільної непрозорої тканини закріплювали захисний ізолюючий чохол, який дозволяв уникати його нагрівання під впливом сонячних променів (рис. 2).

Параметри камери : d = 0,14м, висота h = 0,50м, об'єм V = 0,007693 м^3.

В роботі узагальнено результати проведених досліджень за період 2017-2023 рр. на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах на флювіогляціальних відкладах зони Полісся України.



Рис. 2. Вигляд ізолюючої камери для вимірювання емісії CO_2 із ґрунту та запасів діоксиду вуглецю у ґрунтовому повітрі, які використано під час досліджень : а – розбірна камера з прозорою кришкою для зняття даних із вбудованими приладами та акумулятором; б – прозора кришка із закріпленими метеостанцією (жовтим кольором) та вентилятором з безколекторним електродвигуном (чорним кольором) для перемішування повітряної суміші всередині камери; в – камера з під'єднаним газоаналізатором [14]; г – камера з захисним чохлом.

7. Результати досліджень

В ході досліджень застосовано підхід, який передбачав практичну синхронізацію двох етапів емісійних досліджень – наземного та внутрішньоґрунтового, що надало додаткову

можливість врахування участі окремих частин (шарів) ґрунтового профілю з їх відповідним потенціалом у емісії та секвестрації ґрунтом CO_2.

З метою виявлення особливостей формування ґрунтом потоків CO_2 на межі земної поверхні, проведено поділ потоків на денні нічні та добові.

Під час означеного поділу потоків враховано раніше виявлені нами закономірності перебігу добової емісії CO_2 на ясно-сірому опідзоленому супіщаному ґрунті, близькому до досліджуваного за основними показниками ґрунтової родючості, в агроценозі люцерни 3-го року використання [10]. Головний критерій поділу – це інтенсивність емісії CO_2, яка істотно уповільнювалася починаючи з 23-00 години та помітно підсилювалася з 7-00 години доби. Співвідношення обсягів денної та нічної емісії у зазначених дослідженнях знаходилося в межах від 3 : 1 до 2 : 1.

За тривалість дня обрано період з 7-00 до 23-00 години, ночі – відповідно з 23-00 до 7-00 години ранку.

Значення обсягів емісії CO_2 з ґрунту, як і значення інтенсивності емісії визначаються часом доби та сумісним впливом цілої низки чинників, у першу чергу, температурою, вологістю, концентраціє діоксиду вуглецю у приземному шарі повітря, швидкістю зміни атмосферного тиску та повітряних мас повітря та агробіологічних особливостей сільськогосподарської культури.

Найвищі значення добової емісії CO_2 на дерново-підзолистому глеюватому супіщаному ґрунті в агроценозі жита озимого припадають на кінець червня – першу половину липня, що підтверджується дослідженнями науковців (див. табл. 1).

У цей час вегетація жита озимого завершилася і у ґрунті нагромаджено найбільшу кількість «слідів її перебування» на даному полі. По суті наприкінці вегетації у ґрунті сільськогосподарська культура пособі залишає певний біологічний вуглецевий «відбиток» у вигляді органічної маси – кореневих решток, накопиченої вуглекислоти та специфічної мікробіоти, які багато у чому зумовлюють емісійну активність ґрунту. Саме тому у цей період синхронізація досліджень наземної емісії CO_2 та встановлення закономірностей впливу на її перебіг процесів переміщення діоксиду вуглецю за ґрунтовим профілем є вкрай необхідною.

Спостереження і обліки проведені на дерново-підзолистому глеюватому супіщаному ґрунті в агроценозі жита озимого у різні періоди його вегетації: з найменшою вологістю (з 06.05 по 13.05), з найвищою вологістю (з 17.06 по 24.06) та період завершення вегетації жита озимого (з 15.07 по 22.07) 2018 року (табл. 1).

Таблиця 1. Інтенсивність емісії на дерново-середньопідзолистому глеюватому супіщаному ґрунту в агроценозі жита озимого

Облікові періоди	Середня інтенсивність емісії CO_2 за період, $\frac{кг}{га \cdot год}$			Обсяги емісії CO_2, кг/га		
	денна	нічна	добова	денні	нічні	добові
06.05-13.05	2,28	1,16	1,90	291,2	74,2	365,4
14.05-20.05	4,30	2,19	3,60	481,6	122,8	604,4
21.05-27.05	5,35	2,73	4,48	599,2	152,7	751,9
28.05-03.06	7,75	3,95	6,48	868,0	221,3	1089,3
04.06-10.06	7,68	3,91	6,42	859,6	219,1	1078,7
11.06-16.06	7,70	3,93	6,44	739,2	188,4	927,6

Продовження таблиці 1

17.06-24.06	8,31	4,23	6,95	1063,1	271,0	1334,1
25.06-01.07	6,05	3,08	5,06	677,6	172,7	850,3
02.07-07.07	9,59	4,89	8,03	921,1	234,8	1155,9
08.07-14.07	8,25	4,21	6,90	924,0	235,5	1159,5
15.07-22.07	8,08	4,12	6,76	1033,6	263,5	1297,1
Середнє за добу	*6,78*	*3,46*	*5,67*	*108,44*	*27,64*	*136,08*
За період досліджень, т/га				*8,458*	*2,156*	*10,614*

Під час визначення концентрації CO_2 на різних глибинах, залежно від значення наземної емісії CO_2 використано рівняння [7].

Величину коефіцієнту оновлення запасів ґрунтового повітря (*Kref*) розраховували за формулою (1):

$$Kref = \frac{М_{CO_2}}{З_{CO_2}} \quad (1)$$

де $Kref$ – значення коефіцієнту оновлення,

$М_{CO_2}$ – обсяг емісії CO_2 протягом нічного / денного часу доби

$З_{CO_2}$ – запаси CO_2 у ґрунтовому повітрі на певній глибині.

Як свідчать представлені дані, зі збільшенням глибини, незалежно від внутрішньоґрунтових та наземних зумовлюючих чинників, часу доби та величин запасів та обсягів викидів CO_2, значення коефіцієнтів зменшуються, що свідчить про уповільнення повітряного обміну з глибиною (табл. 2, 3).

Таблиця 2. Середні значення вологості ґрунту, обсяги емісії та запаси CO_2 у ґрунтовому повітрі за періодами спостережень

шар ґрунту, см	Вологість ґрунту та запаси CO_2 ґрунтовому повітрі за періодами					
	з 06.05 по 13.05		з 17.06 по 24.06		з 15.07 по 22.07	
	вологість, об. %	запаси CO_2, кг / га	вологість, об. %	запаси CO_2, кг / га	вологість, об. %	запаси CO_2, кг / га
0-10	2,4	1,633	16,9*	2,306	12,2	2,280
0-20	5,9	2,508	18,4	3,614	15,1	3,970
0-30	7,7	3,311	19,7	4,654	15,0	5,296
0-40	9,1	4,245	19,9	5,965	16,9	6,699
0-50	11,0	4,469	28,5	6,360	18,1	8,806

Денні значення коефіцієнту оновлення, порівняно з нічними, є у 3,5 – 4,5 разів вищими, що узгоджується з добовими осциляціями емісії CO_2.

Враховуючі те, що коефіцієнт оновлення віддзеркалює динамічні функції ґрунту (емісію, повітряний обмін), значення коефіцієнтів для нижніх шарів є нижчими.

Таблиця 3. Коефіцієнти оновлення запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі у дерново-підзолистого глеюватого супіщаного ґрунту в агроценозі жита озимого у різні періоди доби, (*Kref*)

шар ґрунту, см	Періоди спостережень та частини доби								
	з 06.05 по 13.05			з 17.06 по 24.06			з 15.07 по 22.07		
	вночі	вдень	за добу	вночі	вдень	за добу	вночі	вдень	за добу
	Середньодобові обсяги емісії CO_2 та коефіцієнти, *Kref*								
	9,28*	36,40	45,68	33,88	132,90	166,76	32,94	129,20	162,14
0-10	5,7	22,3	28,0	14,7	57,6	72,3	14,4	56,7	71,1
0-20	3,7	14,5	18,2	9,4	36,8	46,1	8,3	32,5	40,8
0-30	2,8	11,0	13,8	7,3	28,6	35,8	6,2	24,4	30,6
0-40	2,2	8,6	10,8	5,7	22,3	28,0	4,9	19,3	24,2
0-50	2,1	8,1	10,2	5,3	20,9	26,2	3,7	14,7	18,4

Значення коефіцієнту оновлення показує у скільки разів обсяги емітованого до атмосфери CO_2 перевищують величини його запасів у певному шарі ґрунту. Оцінка ґрунту лише як суб'єкту емісії CO_2 до атмосфери без врахування наявних надґрунтових умов його функціонування може виявитися недостатньо об'єктивною. Йдеться про необхідність проведення оцінювання ґрунту лише у комплексі з взаємопов'язаним з ним на земній поверхні чинниками: агробіологічними особливостями сільськогосподарської культури та динамічними параметрами атмосфери – абіотичними (температурою, атмосферним тиском, опадами, рельєфом, а також інтенсивністю переміщення повітряних мас) та біотичними (концентрація CO_2), які формуються у приземному (надґрунтовому) шарі.

У випадку дотримання зазначеного підходу, безпосередньо оцінюватиметься вуглецево-емісійна активність ґрунту, а опосередковано – його асиміляційна (здатність до депонування $C_{орг}$) здатність, як взаємопов'язані та взаємно обумовлюючі складові одного природнього процесу.

Розрахунок часу оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря протягом доби (t_{ref}) проводили за формулою (2):

$$t_{ref} = \frac{M_{CO_2}}{S_{CO_2}} \quad (2)$$

де t_{ref} – час оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря,

M_{CO_2} – добові обсяги емісії CO_2,

S_{CO_2} – запаси CO_2 у ґрунтовому повітрі.

Отримані результати часу оновлення запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі t_{ref} дозволяють оцінити інтенсивність повітряного обміну за профілем, залежно від глибини, ступеня зволоженості та значень маси CO_2 (табл. 4).

Таблиця 4. Час оновлення CO_2 ґрунтового повітря у дерново-підзолистому глеюватому супіщаному ґрунті в агроценозі жита озимого, t_{ref}, годин

шар ґрунту, см	Періоди спостережень та частини доби								
	з 06.05 по 13.05			з 17.06 по 24.06			з 15.07 по 22.07		
	вночі	вдень	за добу	вночі	вдень	за добу	вночі	вдень	за добу
	інтенсивність емісії CO_2, кг / га · год								
	1,16	2,28	1,90	4,23	8,31	6,95	4,12	8,08	6,76
	час оновлення запасів CO_2, t_{ref} (у середньому)								
0-10	1,41	0,72	0,86	0,55	0,28	0,33	0,55	0,28	0,34
0-20	2,16	1,10	1,32	0,85	0,43	0,52	0,96	0,49	0,59
0-30	2,85	1,45	1,74	1,10	0,56	0,67	1,29	0,66	0,78
0-40	3,66	1,86	2,23	1,41	0,72	0,86	1,63	0,83	0,99
0-50	3,85	1,96	2,35	1,50	0,77	0,92	2,14	1,09	1,30

Час оновлення показує за який час при певному рівні інтенсивності наземної емісії діоксиду вуглецю відбувається часткове заміщення наявних в ґрунті запасів CO_2 ґрунтового повітря на інші.

Незважаючи на залежність величини запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі від багатьох зумовлюючих чинників під час вегетації жита озимого та певні коливання його значень, визначеній стабілізації сприяла відсутність механічного обробітку ґрунту, характерна для культур суцільного посіву, що в кінцевому результаті сприяло переходу ґрунту у відносно рівноважний стан.

Крім того, отримані результати вказують на уповільнення процесів повітряного обміну з глибиною – зниження значень коефіцієнтів оновлення та збільшення часу оновлення запасів CO_2 у шарах ґрунту.

Таким чином, можна стверджувати, що зі збільшенням глибини та потужності шару ґрунту від поверхні вниз за профілем з відповідними запасами у ґрунтовому повітрі CO_2, порівняно з менш потужними шарами, відбувається стабілізація їх значень, про що свідчать значення коефіцієнту оновлення запасів *Kref*.

Як відомо, швидкість оновлення є віддзеркаленням якості повітряного режиму ґрунту. Тому чим швидше і повніше обмінюється вільне ґрунтове повітря з атмосферним за різних зумовлюючих чинників, тим сприятливіші створюються в ґрунті умови для вегетації культурних рослин та перебігу біохімічних ґрунтових процесів.

Час оновлення запасів двоокису вуглецю у повітрі ґрунту вказує про швидкість його реакції на зміну внутрішніх та зовнішніх (наземних) чинників, які змінюють характер повітряного обміну у певний інтервал часу.

Наведені дані свідчать про збільшення часу оновлення запасів з глибиною. Означена закономірність є загальною для усіх трьох періодів спостережень, незалежно від часу доби, рівня зволоження ґрунту, величин запасів CO_2 та наземної емісії (див. табл. 4).

Швидкість оновлення запасів вдень приблизно вдвічі уповільнюється вночі, коли інтенсивність наземної емісії набуває менших значень.

Надходження у ґрунт атмосферної вологи насиченої киснем, активізує його мікробіологічну активність та пришвидшує продукування CO_2.

Збільшення вологості ґрунту тягне за собою закономірне пришвидшення оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря (у середньому на 40 %).

Так в обліковий період з низькими запасами CO_2 у повітрі ґрунту (з 06.05 по 13.05), порівняно з періодом з найвищою вологістю ґрунту та більшими запасами CO_2 (з 17.06 по 24.06), спостерігалося зниження інтенсивності емісії діоксиду вуглецю. Це пов'язано з тим, що у випадку збільшення вологості частина CO_2 ґрунтового повітря заміщується водою, що призводить до його фізичного витіснення у верхні шари ґрунту з подальшою емісією. При цьому пари H_2O виконують додаткову транспортну функцію, беручи активну участь у масоперенесенні розчиненого CO_2 у зворотному напрямку – з нижніх до верхніх шарів ґрунту.

Порівняння значень часу оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря різних шарів вказує на ступінь мінливості їхньої маси на момент проведення досліджень.

Так, мінливість запасів CO_2 у шарі 0-20 см буде більшою, порівняно з мінливістю відповідних запасів у шарі 0-40 см (див. табл. 4).

Абсолютна величина мінливості (або стабільності) запасів CO_2 взята для періоду 15.07 - 22.07 2018 р., являє собою співвідношення часу оновлення CO_2 ґрунтового повітря t_{ref} для зазначених шарів ґрунту і становить 2,9 разів.

Проведені дослідження дозволяють розрахувати орієнтовні величини стійкості (динамічності) системи «ґрунт – атмосфера».

Отримані вище результати дозволяють запропонувати емпіричне рівняння стійкості (динамічності) наземної повітряної та ґрунтової систем, яке має вигляд формула (3):

$$"Stability\ factor" = \frac{1}{S_{\mathrm{CO_2}}} \qquad (3)$$

де *"Stability factor"* – величина співвідношення стійкості (динамічності) наземної повітряної та ґрунтової систем;

1 – діапазон добової концентрації CO_2 (взято за еквівалент стійкості системи).

S_{CO2} – запаси CO_2 та / або концентрація у наземному та ґрунтовому повітрі.

На основі отриманих даних, розраховано параметри емісійно-асиміляційної стійкості (динамічності) системи «ґрунт – атмосфера» (табл. 5).

Таблиця 5. Таблиця середніх значень емісійно-асиміляційної стійкості (динамічності) системи «ґрунт – атмосфера» на основі концентрацій CO_2 у ґрунтовому повітрі та надґрунтовому шарі повітря під час вегетації культур

№ з/п	Параметри стійкості (динамічності) системи «ґрунт – атмосфера»				
	інтервали концентрації, 1: ppm				
	концентрація CO_2 у надґрунтовому шарі повітря			концентрація CO_2 ґрунтового повітря	система в цілому
	емісія вдень	емісія вночі	за добу		
1	1:430 ÷1:650	1:800 ÷1:1400	1:600 ÷1:1100	1:2000 ÷1:5000	-
значення стійкості					
2	0,60 – 0,72	1,27-1,33	1,0*	3,33 – 4,55	2,30

Примітка.*добові інтервали концентрації прийнято за 1.

Як свідчать наведені дані, стійкість перебігу наземної емісії залежать від часу доби і коливаються в інтервалі від 0,60-1,33. При цьому стійкість ґрунтової ланки емісійної системи приблизно в 6 разів перевищую стійкість наземної.

А стійкість системи «в цілому» приблизно в 3,5 разів перевищує значення наземної її ланки. Виявлені закономірності дають змогу стверджувати, що використання даних про концентрацію або запаси CO_2 у ґрунтовому повітрі надають можливість отримати більш достовірні результати про обсяги наземної емісії та втрати ґрунтом органічного вуглецю. Узагальнення результатів досліджень дозволяють краще оцінити їх значущість (табл. 6).

Таблиця 6. Вплив показників стану ґрунту та атмосфери на динаміку величин емісії, розподілу запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі та оцінка можливості їхньої зміни

№ з/п	Показники, характер та оцінка можливості впливу						
	стану ґрунту та атмосфери		безпосередній вплив показника на		можливість зміни показника**		
			наземну емісію	розподіл CO_2 за профілем	відсутня	обмежена	поширена
1	температура	атмосферного повітря	+*	+	x		
2		поверхні ґрунту	+	/-/			x
3		на глибині < 10 см	+	/-/			x
4		на глибині > 10 см	/-/	+			x
5	вологість ґрунту		+	+			x
6	атмосферний тиск		+	+	x		
7	гранулометричний склад ґрунту		+	+	x		
8	вміст органічного вуглецю, гумусу		+	/-/			x
9	наявність вільних пор аерації в ґрунті		+	+		x	
10	концентрація CO_2 у надґрунтовому шарі повітря на висоті 0,35-0,50 м		+	+			x
11	концентрація CO_2 у ґрунтовому повітрі		+	+			x
12	вміст лужногідролізуємого азоту, сума ввібраних основ та зольність ґрунту		+	/-/			x

Примітка. *"+" вплив визначено,«-» вплив не визначено, "/-/" - вплив не вивчався; **можливість зміни показника: «відсутня» - вплив на зміну чинника відсутній або значно обмежений; «обмежена» - проведення спеціальних заходів, як правило, вартісне та мало ефективне; «поширена» - проведення регулювання параметрів показника в ході застосування відповідних технологій вирощування сільськогосподарських культур як супутнього.

Результати досліджень представлені в таблиці вказують на наявність безпосереднього зв'язку та взаємну обумовленість наземної емісії та запасів у ґрунтовому повітрі діоксиду вуглецю. З чинників, які вивчалися і є спільними для обох означених величин в частині впливу на наземну емісію та збільшення запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі є найбільш значущі це: вологість ґрунту, атмосферний тиск, гранулометричний склад ґрунту, наявність вільних пор аерації в ґрунті, концентрація CO_2 у надґрунтовому шарі повітря на висоті 0,35-0,50 м, концентрація CO_2 у ґрунтовому повітрі.

Виходячи з отриманих результатів, оцінено можливість зміни окремих показників під час вирощування сільськогосподарських культур. Цілеспрямований вплив на визначальні чинники довкілля (температуру повітря, атмосферний тиск), а також гранулометричний склад ґрунту, які становлять 25 % від їх загальної кількості, практично неможливий. Решта показників, що складають три чверті від загальної кількості досліджуваних, відносно легко трансформуються, переважно, завдяки застосуванню відповідних агрогенних впливів (меліоративні заходи та елементи агротехнологій).

Наприклад, погіршення режиму зволоження, у першу чергу мало структурованих ґрунтів, до яких відноситься й дерново-підзолистий глеюватий супіщаний ґрунт, неминуче призводить до його ущільнення, і як наслідок до зниження параметрів аерованості. При цьому маса органічного вуглецю у газоподібній формі також знижується.

8. Висновки

Узагальнення проведених нами досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

Показано, що емісійно-асиміляційну активність ґрунту необхідно розглядати у якості єдиної та взаємно обумовлюючої системи біологічного обігу органічного вуглецю у двох протилежних напрямках «ґрунт → атмосфера» та атмосфера → ґрунт», яка функціонує важливої у складі ланки загального колообігу цього елементу під час виробництва рослинницької продукції.

Виявлено, що коефіцієнт оновлення запасів CO_2 у ґрунтовому повітрі опосередковано враховує: здатність ґрунту щодо забезпечення виведення з його профілю на земну поверхню продукованого кореневими системами рослин та ґрунтовою мікробіотою CO_2; роль окремих шарів ґрунту у продукуванні та транспортуванні двоокису вуглецю у напряму від нижчих горизонтів до земної поверхні.

Доведено залежність збільшення часу оновлення запасів з глибиною. Означена закономірність є загальною для усіх трьох періодів спостережень, незалежно від часу доби, рівня зволоження ґрунту, величин запасів CO_2 та значень наземної емісії. Порівняння значень часу оновлення запасів CO_2 ґрунтового повітря різних шарів вказує на ступінь мінливості їх маси на момент проведення досліджень, яка залежить від глибини, вологості та сумісному впливу комплексу чинників довкілля.

Встановлено, що коефіцієнт стійкості перебігу наземної емісії залежать від часу доби і коливаються в інтервалі від 0,60-1,33. При цьому стійкість ґрунтової ланки емісійної системи дерново-підзолистого глеюватого супіщаного ґрунту на водно-льодовикових відкладах майже в 6 разів перевищую стійкість наземної її частини.

Зважаючи на вище означене та враховуючи певну індуктивну компоненту, отримані результати досліджень у випадку оцінки емісійно-асиміляційного потенціалу та повітряного режиму ґрунтів різних типів опосередковано вказують на доцільність дотримання комплексного підходу (поєднання наземного та етапу вимірювань за профілем ґрунту), що значно підвищить об’єктивність такої оцінки.

9. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Слід констатувати, що вміст $C_{орг}$ опосередковано віддзеркалює рівень інтегрованості ґрунту до умов зовнішнього середовища, які передували моменту досліджень, а емісійна активність ґрунтів враховує ступінь впливу факторів зовнішнього середовища, що перебувають у стадії трансформування (наприклад унаслідок глобальних процесів зміни клімату) та які склалися на момент проведення досліджень. Дані про емісію CO_2 з ґрунтів під час вегетації сільськогосподарських культур необхідно розглядати у якості невід’ємних компонентів оцінки рівня їхньої родючості. А величини обсягів емісії CO_2 ґрунтами разом з їх

здатністю до секвестрування органічного вуглецю в умовах кліматичних змін можуть складати критеріальну - базову основу сталого землекористування.

Список літератури:

1) Пліско І. В. (2019). Просторово-диференційована система управління якістю ґрунтів (на прикладі ріллі України): Дис. на здоб. наук. ступ. док. сільськогосп. наук: спец. 06.01.03 «Агроґрунтознавство і агрофізика», м. Харків, 469с.

2) Трофименко П.І., Борисов Ф.І., Трофименко Н.В., Веремеєнко С.І. (2020). «Пристрій для визначення біологічної активності ґрунту». Пат. № 121805 Україна, МПК G01N 1/22 (2006.01) G01N 7/14 (2006.01), *Бюл. № 14*.

3) Трофименко П.І., Борисов Ф.І. (2018). Спосіб визначення інтенсивності емісії газів з ґрунту: пат. № 117911 Україна, МПК G01N 33/24 (2006.01) G01N 7/14 (2006.01) *Бюл. № 20*.

5) ДСТУ ISO 11259:2004. (2006). Спрощений опис ґрунту. Якість ґрунту. (ISO 11259:1998, IDT) Офіційне видання. Київ, Держспоживстандарт України.

4) Ткачук В. П., Трофименко П. І. (2020). Вміст гумусу за різного використання дерново-підзолистого супіщаного ґрунту та обсяги емісійних втрат CO_2. *Наукові доповіді НУБіП України № 2 (84)*, м. Київ.

5) Трофименко П.І. (2018). Газовий склад надґрунтового шару повітря атмосфери та його роль у формуванні обсягів емісії газів з ґрунту. *Таврійський науковий вісник Херсонського національного аграрного університету,* №103, С. 227-235, м. Херсон, 2018.

6) Трофименко П. І., Трофименко Н. В. (2018). Інтенсивність емісії CO_2 з ґрунтів Полісся під час вегетації культур та домінантність зумовлюючих її чинників. Меліорація і водне господарство. *Міжвідомчий тематичний науковий збірник Інституту водних проблем і меліорації Національної Академії Аграрних наук* № 1(107), С. 47-54.

7) Трофименко П. И., Трофименко Н. В., Борисов Ф. И., Зацерковный В. И. (2019). Методология исследования и профильное распределение концентрации диоксида углерода в воздухе дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы. *Почвоведение и агрохимия, г. Минск.* № 1(62), С. 73-81.

8) Трофименко П. І., Цуман Н. В., Трофименко Н. В. (2020). Дискретна оцінка емісійно-асиміляційних потоків діоксиду вуглецю на органогенних меліорованих ґрунтах агроландшафтів Полісся України. *Таврійський науковий вісник Херсонського національного аграрного університету* № 112. С. 233-241.

9) Трофименко П.И., Борисов Ф.И., Трофименко Н.В. (2015). Интенсивность дыхания почв левобережного Полесья Украины в условиях агроценоза. *Почвоведение и агрохимия, г. Горки* № 2 (55), С. 56-65.

10) Трофименко П.І., Іванік О. М., Трофименко Н. В. (2019). Методологія моніторингу CO_2 в системі «ґрунт - атмосфера - рослина» та добовий біологічний колообіг вуглецю ґрунтів агроландшафтів Полісся України. *Таврійський науковий вісник Херсонського національного аграрного університету*, № 110., Ч 2., С. 232-243.

11) Трофименко П.І., Трофименко Н.В., Веремеєнко С.І., Борисов Ф.І. (2019). Методологія визначення інтенсивності дихання ґрунтів та емісійні втрати вуглецю агроландшафтами Лівобережного Полісся наприкінці періоду вегетації рослин. *Вісник Львівського національного аграрного університету*, С. 238-243.

12) Трофименко П.І., Ткачук В.П., Трофименко Н.В. (2020). Вплив систем обробітку та удобрення на інтенсивність емісії дерново - середньопідзолистого супіщаного ґрунту та асиміляції CO_2 сільськогосподарськими культурами в умовах Полісся. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва*. № 1. С. 22 - 31.

13) Трофименко, П.І., Борисов Ф.І. (2015). Наукове обґрунтування алгоритму застосування камерного статичного методу визначення інтенсивності емісії парникових газів із ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство*. № 83. С. 17–24.

14) Bediengsanleitung. Testo 535 (2015). Step Systems. Deutschland, Nürnberg.

15) Bondar O.I., Trofymenko P.I., Trofimenko N.V., Zatserkovnyi V.I., Borysov F.I. (2019). Development of algorithm for calculating exposition value of CO_2 concentration in air for tasks of monitoring of soils of Ukraine Polissya agro-landscapes. XIIIth International conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment 12–15 November, Kyiv, Ukraine. URL: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193445839.

16) Brinton W. (2015). Активность CO_2 в почве. Инфоиндустрия / E-Journal. URL: http://surl.li/obcne. (Дата звернення 20.11.2023).

17) Herrick, J. E. (2000): Soil quality: an indicator of sustainable land management?, *Appl. Soil Ecol.*, 15, 75–83.

18) Martin R. Carter (2002). Soil Quality for Sustainable Land Management, *Agronomy Journal*, 94, 1, (38-47).

19) Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., and Patra, A. K. (2007): Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol, Agr. Ecosyst. Environ., 118, 130–142, https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.008. (Дата звернення 20.11.2023).

20) Reeves, D. W. (1997): The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems, *Soil Till. Res.*, 43, 131–167,

21) Reicosky D. C., Sauer T. J. and Hatfield J. L. (2015). Challenging Balance between Productivity and Environmental Quality: *Tillage Impacts, Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture*, (13-37).

22) Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., Hong, S. Y., Rawlins, B. G., and Field, D. J. (2015): Global soil organic carbon assessment, Glob. Food Secur.-Agr., 6, 9–16, https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001, (Дата звернення 20.11.2023).

23) Zvomuya, F., Janzen, H. H., Larney, F. J., and Olson, B. M. (2008): A Long-Term Field Bioassay of Soil Quality Indicators in a Semiarid Environment, Soil Sci. Soc. Am. J., 72, 683, https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0180, (Дата звернення 20.11.2023).

Differentiation of the profile distribution of CO_2 in soil air and evaluation of the "soil-atmosphere" system's resistance to abiotic impacts

Petro Trofymenko
Institute of Geology, Department of Geoinformatics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-7692-5785

Abstract: The article presents the results of research on the differentiation of the profile distribution of carbon dioxide in soil air and evaluates the stability of the "soil-atmosphere" system to abiotic influences. It is shown that the emission-assimilation activity of the soil should be considered as a single and mutually determining system of the biological cycle of organic carbon in two opposite directions, "soil ↔ atmosphere" and "atmosphere ↔ soil", as an important link in the overall circulation of this element during the production of agricultural products. The coefficient Kref (carbon dioxide replenishment in soil air) and the time of carbon dioxide replenishment (tref) are proposed as criteria for assessing the state of the "soil ↔ atmosphere" system in terms of abiotic influences. These criteria allow evaluating the intensity of air exchange along the profile, depending on depth, moisture content, and carbon dioxide mass values. An important criterion for assessing the stability (dynamism) of the "soil ↔ atmosphere" system is the coefficient of system stability (Stability factor), which is calculated based on empirical equations and represents the ratio between carbon dioxide stocks in the surface layer of air and in soil air (or based on the ratio of concentration values). The dependence of the increase in replenishment time on depth is proven. The regularity is common for all three observation periods, regardless of the time of day, soil moisture level, carbon dioxide reservoir sizes, and surface emissions. Comparison of carbon dioxide replenishment times in different layers of soil air indicates the degree of variability of their mass at the time of the study, which

depends on depth, moisture, and the combined effect of environmental factors. It is established that the stability coefficient of carbon dioxide emission from soils depends on the time of day and varies in the range of 0.60-1.33. In this case, the stability of the soil emission system of soddy-medium podzolic sandy loam gleyic soil on fluvio-glacial deposits is almost 6 times higher than the stability of its surface part. Therefore, the evaluation of the emission-assimilation stability of the soil to abiotic impacts and the calculation of the Stability factor are proposed to be conducted within the "soil ↔ atmosphere" system, which will improve its objectivity.

Key words: profile distribution, CO_2 reserves, system stability, static method, emission, assimilation.